

基于无线信道信息的 5G 与 TSN 联合调度机制研究

孙雷¹, 王健全¹, 林尚静², 马彰超¹, 李卫³, Qilian Liang⁴, 黄蓉⁵

(1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083; 2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;
3. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083; 4. 美国得克萨斯大学阿灵顿分校电子工程系, 得克萨斯 76019;
5. 中国联通研究院, 北京 100048)

摘 要: 针对具备周期性及时间触发特征的工业业务在无线环境下的确定性传输问题, 提出了一种基于空口信道质量信息的 5G 与时间敏感网络联合优化机制。在时间敏感网络中, 改进了时间敏感网络业务流处理架构, 优先处理承载于较差质量无线信道的工业业务流; 在 5G 网络中, 分析了 5G 系统传输时延影响因素, 对无线信道质量、无线资源数量与空口最大传输次数的关系进行建模, 基于该模型可得到满足数据传输可靠度要求的最大重传次数, 从而可动态设置重传因子以动态规划承载于不同无线资源上的工业业务的 5G 系统传输时延预算。仿真结果表明, 所提联合调度机制能降低承载于较差信道质量的工业业务的时间敏感网络域传输时延, 并能有效消除 5G 空口随机变化导致的重传对传输时延造成的抖动, 实现工业业务端到端确定性时延保障。

关键词: 5G 与时间敏感网络; 联合调度; 工业业务; 跨网确定性传输; 端到端确定性时延

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021224

Research on 5G-TSN joint scheduling mechanism based on radio channel information

SUN Lei¹, WANG Jianquan¹, LIN Shangjing², MA Zhangchao¹, LI Wei³, Qilian Liang⁴, HUANG Rong⁵

1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

3. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

4. Department of Electrical Engineering, University of Texas at Arlington, Texas 76019, USA

5. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China

Abstract: To solve the deterministic transmission problem of periodic and time-triggered industrial traffics in wireless environment, a joint optimization mechanism of 5G and time sensitive networking based on radio channel information was considered. Based on improved traffic process architecture in time sensitive network, the traffics bearing on radio channel with worse quality could be processed in priority. In 5G networks, the relationship among radio channel quality, resource numbers and the maximum transmission times over radio was modeled, and the maximum transmission times satisfied data transmission reliable probability could be computed from the model, then the transmission time budget in 5G system for multiple industrial traffics bearing on diverse radio resources could be adjusted dynamically by retransmission factors. Simulation results demonstrate that the proposed joint scheduling mechanism achieves less TSN transmission delay of industrial traffics bearing on worse quality radio resources and can eliminate jitter caused by retransmission due to variation of 5G radio channel, which can guarantee end-to-end deterministic delay for industrial traffics.

Keywords: 5G and time-sensitive networking, joint scheduling, industrial traffic, deterministic transmission cross networks, end-to-end deterministic delay

收稿日期: 2021-05-28; 修回日期: 2021-08-27

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFB1708800); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.FRF-MP-20-37); 广东省重点领域研发计划基金资助项目 (No.2020B0101130007)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1708800), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.FRF-MP-20-37), Guangdong Provincial Key Research and Development Program (No.2020B0101130007)

1 引言

5G 与工业互联网协同与融合成为当前学术研究热点^[1-3]。因具备低时延、高可靠连接能力, 5G 赋能行业应用成为通信和产业界共同的需求。然而, 工业业务对承载网络性能要求极为严格, 不仅需要承载网络具备低时延、低抖动和高可靠性能, 还应具备确定性时延保障的能力, 对于工业控制系统而言, 确定性时延是其系统安全可控的基础^[4]。因此, 如何提升 5G 系统的确定性时延保障能力, 成为 5G 深度赋能工业核心环节的关键技术问题^[5-6]。

时间敏感网络 (TSN, time-sensitive networking) 是由 IEEE 802.1 工作组在标准以太网基础上针对时间同步、资源管理、流量整形、网络配置等技术进行二层增强而形成的一系列标准规范^[7-9]。在技术层面, TSN 在实现各节点间高精度时间同步的基础上, 不仅能保证具有强实时需求的时间触发业务流端到端传输时延和抖动的有界性, 还能实现非实时类业务及尽力而为型业务的“一网传输”。在组网层面, TSN 因兼容标准以太网协议, 能够实现与异构工业现场通信协议的协同, 前向兼容异构现场通信协议。然而, 由于大量传感器在设备、车间及工厂中的部署, 以及机器臂、移动机器人等智能化终端在生产线上的广泛使用, 有线 TSN 难以满足智能工厂终端接入及数据传输需求, 5G 与 TSN 的融合协同不仅是 5G 向工业领域延展的需求, 更是智能工厂内生需求的驱动^[10-11]。

2020 年 7 月发布的 3GPP R16 提出了 5G TSN 桥接网络架构, 将 5G 系统整体视为一个逻辑的 TSN 网桥, 分别在 5G 系统的核心网侧和终端侧增加了支持 TSN 时间同步和门控功能的实体, 提供跨 5G 与 TSN 的端到端确定性传输保障, 以更好地实现 5G 对工业控制业务的承载^[12]。

当前, 针对 5G 与 TSN 协同传输的研究才刚起步, 研究更多聚焦于网络架构、功能实体与网络接口层面^[13-15], 针对 5G 与 TSN 联合调度算法、协同传输机制层面的研究则相对缺乏。因此, 在 3GPP 提出的 5G-TSN 桥接网络架构基础上, 本文针对时间触发业务流的跨域联合调度方面做了初步的研究探索, 主要工作如下。

1) 基于 3GPP R16 提出的 5G TSN 桥接网络架构特征及新增网元功能, 分析 5G 支持 IEEE 802.1Qbv 门控的数据转发机制, 阐述 5G-TSN 协

同架构下的数据端到端传输流程。

2) 针对无线信道时变对 5G-TSN 数据跨网传输带来的时延抖动影响, 分析 5G 系统传输时延预算对端到端数据确定性传输的重要性, 将 5G 系统传输时延分为与信道相关和与信道无关的时延, 对信道相关时延的影响因素进行建模。

3) 针对 5G 与 TSN 跨域协同传输需求, 提出了一种基于无线信道质量信息的 5G-TSN 联合优化机制, 主要包含两方面: 一方面, 提出了 TSN 域中基于 5G 信道质量信息的业务流两层处理架构, 提升承载于较差信道质量无线资源上的工业业务流优先级, 结合业务优先级、无线信道质量信息对不同工业业务流的 TSN 域传输时延进行建模分析; 另一方面, 提出了基于重传因子的工业业务流 5G 系统传输时延预算动态调节机制, 分析不同信道质量下丢包率要求、无线资源数量与最大重传次数的关系, 为承载于不同 5G 空口资源的时间触发业务设置不同重传因子, 消除数据包在 5G 系统传输带来的时间抖动, 从而为时间触发业务流提供确定性端到端时延保障。

2 研究现状与问题分析

2.1 5G-TSN 桥接网络架构

3GPP R16 定义的 5G TSN 网桥架构如图 1 所示, 其在 5G 核心网用户面和控制面增加了新的功能实体, 实现跨域业务参数交互 (时间信息、优先级信息、包大小及间隔、流方向等)、端口及队列管理、QoS 映射等功能, 支持跨 5G 与 TSN 的时间触发业务流端到端确定性传输^[16]。

在控制面, 5G TSN 新增了 TSN 应用功能实体 (TSN-AF, TSN-application function), 主要完成三方面的功能: 首先, 与 TSN 域中集中网络配置 (CNC, centralized network configuration) 实体的交互, 实现 TSN 流传递方向、流周期、传输时延预算、业务优先级等参数与 5G 的交互与传递; 其次, 与 5G 核心网中策略控制功能 (PCF, policy & control function)、会话管理功能 (SMF, session management function) 等实体的交互, 实现 TSN 业务流关键参数在 5G 时钟下的修正与传递, 并结合 TSN 业务流优先级配置相应的 5G 服务质量 (QoS, quality of service) 模板, 实现 5G 内的 QoS 保障; 最后, TSN-AF 将与用户面功能 (UPF, user plane function) 网关及终端侧转换网关交互, 实现 5G TSN 网桥端口配置

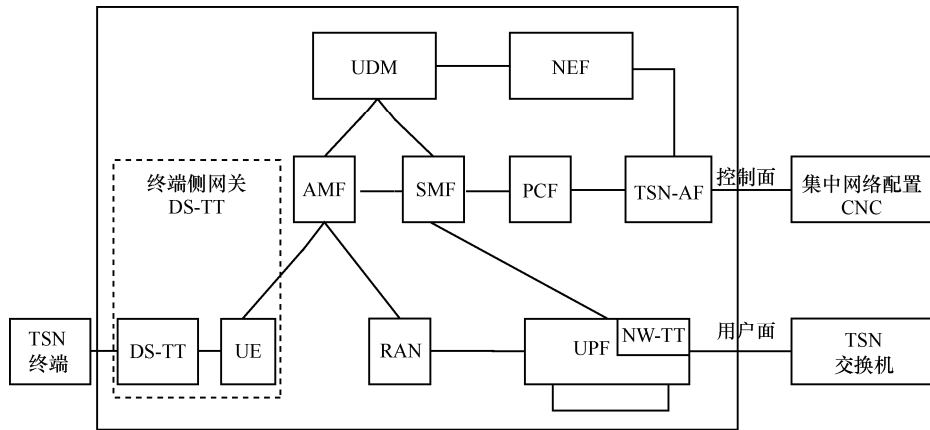


图 1 3GPP R16 定义的 5G TSN 网桥架构

及管理功能。

在用户面，为避免 TSN 协议对 5G 新空口造成过多影响，5G 系统边界增加了协议转换网关：在 UPF 中新增网络侧 TSN 转换器（NW-TT, network TSN translator），在 5G 终端侧增加了设备侧 TSN 转换器（DS-TT, device side TSN translator）。NW-TT 和 DS-TT 支持 IEEE802.1AS、802.1AB 及 802.1Qbv 等 TSN 的核心基础技术协议。UPF 增加了对 5G 域和 TSN 域时钟信息交互及监控功能，实现跨域的时钟信息同步；在此基础上，UPF 需实现基于精准时间的调度转发机制，提供桥接的二层服务，实现快速的数据包处理和转发。

IEEE802.1Qcc 集中式网络架构下的 5G 逻辑网桥如图 2 所示。从系统整体角度，5G 网络被视为一个逻辑的 TSN 网桥，由 DS-TT 和 NW-TT 提供基

于精准时间的 TSN 数据流驻留和转发机制。

2.2 5G-TSN 端到端数据确定性传输流程

IEEE802.1Qbv 提出了时间感知整形器（TAS, time aware shaping），基于业务流的优先级代码（PCP, priority code point）将数据包映射到不同的出口队列，通过预先设定的周期性门控列表（GCL, gate control list）对出口队列开/关进行控制，避免低优先级业务对高优先级业务的干扰，为高优先级业务传输提供确定性保障^[17]。TAS 是为了更低时间粒度、更严苛工业控制应用而设计的调度机制，被工业自动化领域所采纳^[18]，也是 5G 系统中 NW-TT 与 DS-TT 必须支持的关键核心协议。

5G-TSN 协同数据传输流程如图 3 所示。ES₁ 和 ES₂ 是可编程逻辑控制器（PLC, programmable logic controller），周期性产生控制指令，并将指令

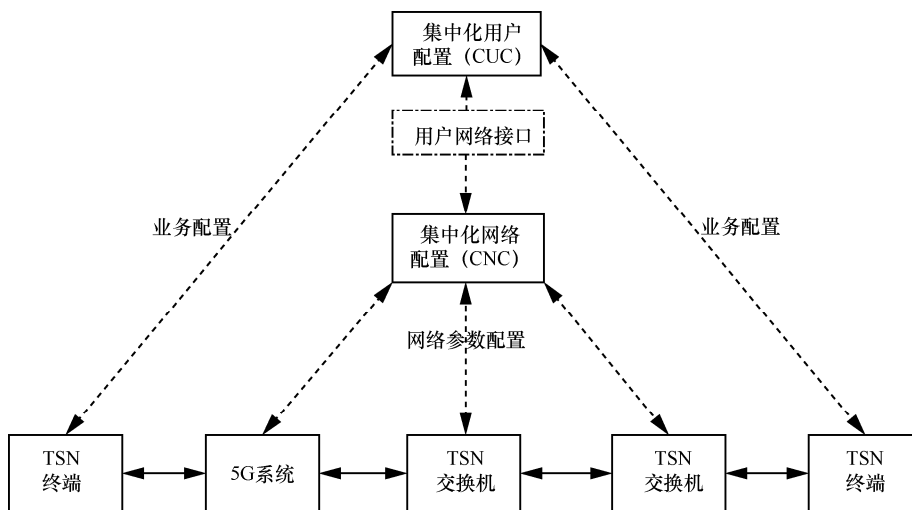


图 2 IEEE802.1Qcc 集中式网络架构下的 5G 逻辑网桥

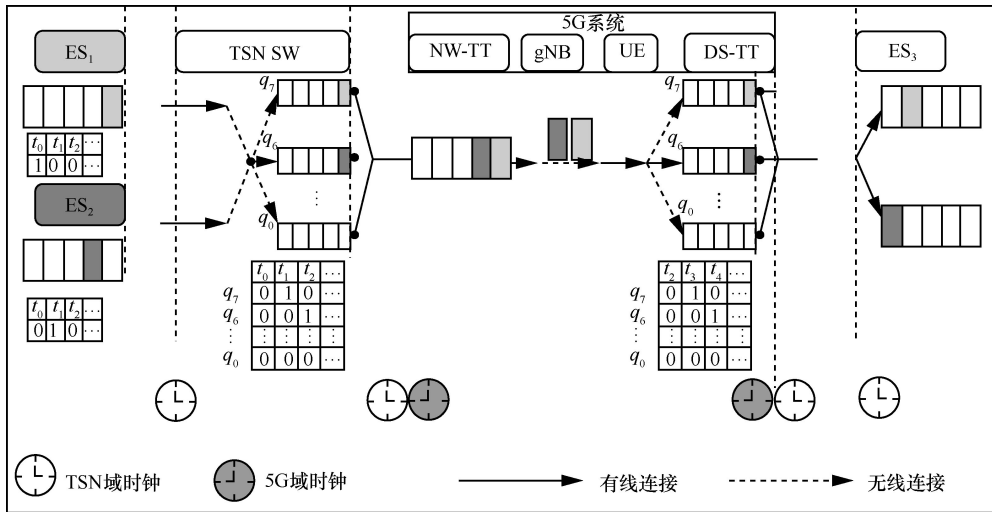


图 3 5G-TSN 协同数据传输流程

经由 5G-TSN 协同网络发送给位于远端的执行器 ES3。ES1 和 ES2 将业务流信息（周期、包长度等）上报给集中化用户配置（CUC, centralized user configuration），CUC 将业务信息传递给 CNC 进行路径规划与资源调度，并对传输链路中 TSN 交换机（TSN SW, TSN switch）和 5G 系统中 DS-TT 的出口队列门控列表进行配置。

如图 3 中 TSN SW 和 DS-TT 下方列表所示，在 t_1 时刻，TSN 交换机出口队列的门控列表设置为 10000000，其中，1 代表相应队列的控制门为开，数据可以发送，而其他队列中的数据将继续等待；在 t_3 时刻（ $t_3 > t_1$ ），DS-TT 出口队列门控列表设置为 10000000，经由 UPF 和 5G 空口发送到 DS-TT 的 ES₁ 业务流数据包将发送到 ES₃，则该 ES₁ 数据包到达 ES₃ 的时刻为

$$t_{\text{arrive}}^{\text{es1}} = t_3 + \frac{l_1}{R_{\text{TSN}}} \quad (1)$$

其中， l_1 为 ES₁ 发送业务流数据包长度。在包长度及网络速率一定的情况下，由于 DS-TT 侧设置的发送时间 t_3 是确定的，因此 $t_{\text{arrive}}^{\text{es1}}$ 也是一个确定值。由于门控列表是周期性设置，假设门控列表周期为 T_{GCL} ，则 ES₁ 业务流到达 ES₃ 的时间为 $t_{\text{arrive}}^{\text{es1}}, T_{\text{GCL}} + t_{\text{arrive}}^{\text{es1}}, 2T_{\text{GCL}} + t_{\text{arrive}}^{\text{es1}}, 3T_{\text{GCL}} + t_{\text{arrive}}^{\text{es1}}, \dots$ ，从而保证时间触发业务流传输时延的确定性。

2.3 空口不确定性对端到端数据传输影响分析

5G-TSN 协同面临的重大挑战在于 5G 空口时变特性对确定性数据传输造成的不可控影响^[19]。图 4 和图 5 分析了 5G 空口变化带来的影响。

空口变化造成数据包顺序紊乱如图 4 所示。数据包 1~数据包 3 为具有同等优先级的业务流，然而，在 5G 空口传输部分，由于数据包 1 被分配的无线资源信道状况较差，出现了丢包，需要对该数据包进行重传，这将导致在接收端出现数据包顺序的紊乱，出现时延抖动。

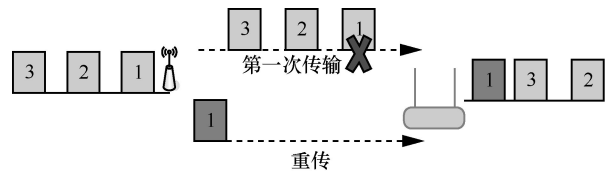


图 4 空口变化造成数据包顺序紊乱

空口变化造成数据包丢失如图 5 所示，数据包 A 和数据包 B 是不同优先级的业务流，将被映射到不同的出口队列中。然而，数据包 B 在空口传输时出现信道状况极差的情景，出现多次重传，最终导致超时发生丢包，造成接收端收到数据的不完整。

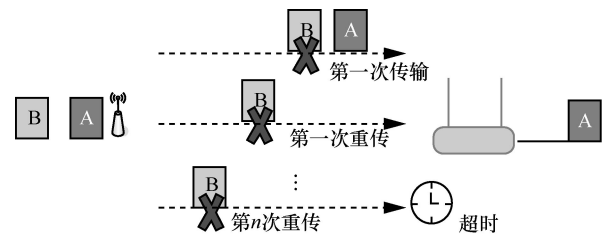


图 5 空口变化造成数据包丢失

2.4 5G 系统传输时延预算

在 5G TSN 网桥架构中，3GPP 仅定义了在一侧

的边缘网关 NW-TT 及 DS-TT 支持 TSN 协议。为了降低有效的空口变化对数据传输造成的时延抖动，本文定义了工业业务流的 5G 系统传输时延预算，即时间触发业务流数据包进入 5G 入口 (NW-TT/DS-TT) 与离开 5G 出口 (DS-TT/NW-TT) 之间的时间差。5G-TSN 协同架构下端到端数据传输如图 6 所示。

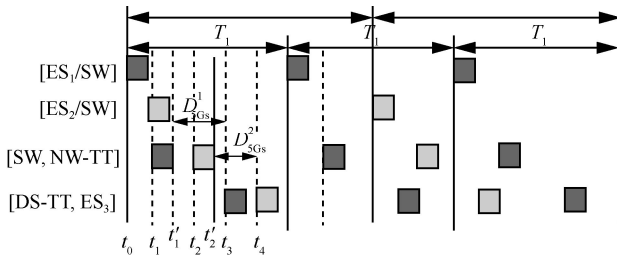


图 6 5G-TSN 协同架构下端到端数据传输

以 ES_1 发送的时间触发业务流为例，数据包从 DS-TT 的发送时刻 t_3 由 5G 系统传输时延预算 D_{5Gs}^1 决定，即

$$t_3 = t_1' + D_{5Gs}^1 \quad (2)$$

其中， D_{5Gs}^1 表示业务流 1 的 5G 系统传输时延预算，包括 5G 核心网处理及传输时延、5G 基站/终端处理时延及空口传输时延。由于 5G 无线信道时变特性，导致时间触发业务流数据包在 5G 网络中的传输时延 t_{5Gs}^1 是变化的，若 $t_1' + t_{5Gs}^1 < t_3$ ，即 ES_1 数据包在 5G 系统传输时延预算之前到达，则该数据包仍在队列中等待，直到 t_3 时刻才发送，消除因 5G 空口变化而造成的传输时延抖动；若 $t_1' + t_{5Gs}^1 > t_3$ ，即数据包未能在要求的时间内将数据包发送到 DS-TT，由于 DS-TT 出口队列门控列表状态已经改变，该业务流所对应队列已经关闭，造成该数据包无法在规定周期内进行传送，影响控制业务流的稳定性。

因此，5G 系统传输时延预算对于消除 5G 系统的不确定性，保障 5G-TSN 端到端数据确定性传输性能具有十分重要的作用。

3 5G-TSN 联合时间调度机制

3.1 系统模型与问题分析

5G-TSN 协同网络架构如图 7 所示，主要由 TSN 域交换机、5G 核心网网元、5G 基站、移动终端及支持 TSN 的终端站点构成。设 \mathbf{V} 为网络设备节点

的集合， $\mathbf{V} \equiv \text{SW} \cup \text{5Gs}$ ，其中， sw_i 是 TSN 中的交换机节点， $\forall \text{sw}_i \in \text{SW}$ ； ES_{tx} 和 ES_{rx} 分别为发送和接收终端节点的集合； es_i 为 TSN 终端节点， $\forall \text{es}_i \in ES_{\text{tx}} \cup ES_{\text{rx}}$ ，假设所有的 TSN 终端节点均支持接入 5G 网络和 TSN。

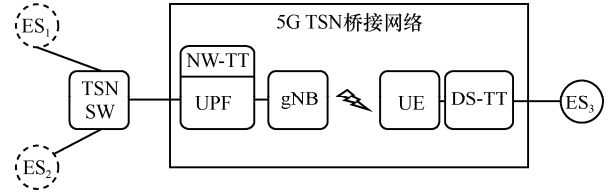


图 7 5G-TSN 协同网络架构

在业务类型方面，假设每个发送终端只能承载一种业务。对于 $\forall \text{es}_i \in ES_{\text{tx}}$ ，其发送的业务流 f_i 构成了网络中的业务流集合 \mathbf{F} ，业务需求表示为

$$\mathbf{R}(f_i) = \{ \langle \text{es}_s, \text{es}_d, T_i, D_i, l_i, p_i \rangle \mid f_i \in \mathbf{F} \} \quad (3)$$

其中， es_s 和 es_d 为该业务流的源节点和目的节点； T_i 为数据包发送周期，对于非周期性业务而言，该值为空，并假设周期性业务流在一个周期内仅产生一个数据包； D_i 为该业务流的时延要求，对于时间触发业务流而言， $D_i = T_i$ ； l_i 为该业务流数据包大小（单位为 B）； p_i 为该业务流的优先级，时间触发业务流优先级高于其他非实时类业务优先级。对于 2 个时间触发业务流 f_i 和 f_j ，若 $T_i < T_j$ ，则 $p_i > p_j$ 。本文重点针对具有周期及时间触发特征的工业业务流的联合时间调度机制开展研究。

$\forall f_i \in \mathbf{F}$ ，其端到端时延及业务 QoS 要求可表示为

$$\begin{cases} D_{\text{e2e}}^i = D_{\text{TSN}}^i + D_{5Gs}^i + (N_{\text{hop}} + 1) \frac{l_i}{R_{\text{TSN}}} \\ D_{\text{e2e}}^i < T_i \end{cases} \quad (4)$$

其中， D_{TSN}^i 为 TSN 域时间，包含处理时延和排队时延； D_{5Gs}^i 为 5G 系统传输时延预算； N_{hop} 为该业务流经过的 TSN 交换机节点的跳数，5G 被看作一个逻辑网桥设备； l_i/R_{TSN} 为有线链路传输时延， R_{TSN} 为以太网的传输速率； $D_{\text{e2e}}^i < T_i$ 为保障时间触发业务流的 QoS 要求。

基于式(4)分析，由于业务流及网络拓扑信息已知，且有线链路传输时延是固定的，因此，可将式(4)业务的 QoS 要求进一步改写为

$$\begin{cases} D'_i = T_i - (N_{\text{hop}} + 1) \frac{l_i}{R_{\text{TSN}}} \\ D_{\text{TSN}}^i + D_{\text{SGs}}^i < D'_i \end{cases} \quad (5)$$

在此约束下，下面分析 D_{TSN}^i 与 D_{SGs}^i 的设置。

3.2 基于 5G 信道信息的 TSN 域队列管理

在 5G 系统中，移动终端会周期测量无线信道质量，并上报信道质量指示 (CQI, channel quality information)，以实现动态调度和链路自适应适配。在 5G-TSN 协同传输网络中，由于不同业务流在 5G 中所分配的无线资源不同，无线信道状况也存在差异，因此需要对 TSN 域中业务流处理机制进行改进。基于 5G 信道信息的 TSN 队列管控架构如图 8 所示。TSN 交换机中提出了基于无线信道信息的优先级队列两层管控架构：第一层为业务流优先级映射，根据业务优先级将工业业务进行分类；第二层为同一优先级下基于 5G 信道信息的队列选择，优先选择承载于较差信道质量无线资源上的工业业务流数据包进行处理。

假设当前业务流为 f_i ，当前周期内业务优先级比 f_i 高的业务流数目为 N_m ；而在与 f_i 同等优先级的业务流中，CQI 比 f_i 低的业务流数目为 N_s 。由于 TSN SW 与 NW-TT 间仅有一条链路，当前包需要等待前一个数据包完全发送后才能发送，由此， D_{TSN}^i 可表示为

$$D_{\text{TSN}}^i = \sum_{j=1}^{N_m} \frac{l_j}{R_{\text{TSN}}} + \sum_{o=1}^{N_s} \frac{l_o}{R_{\text{TSN}}} \quad (6)$$

由式(6)可以看出，业务流优先级越高，其在 TSN 域时间就越短，无线信道质量越差，在 TSN 域中将会越先得到处理，即

$$\begin{cases} D_{\text{TSN}}^i < D_{\text{TSN}}^j, p_i > p_j \\ D_{\text{TSN}}^i < D_{\text{TSN}}^j, (p_i = p_j) \cup (CQI_i < CQI_j) \end{cases} \quad (7)$$

3.3 基于信道信息的 5G 系统传输时延预算设置

根据 5G 系统构成，针对 $\forall f_i \in F$ ，可以将 5G 系统传输时延预算分为两部分，即

$$D_{\text{SGs}}^i = \tau(\gamma_i) + \phi_i \quad (8)$$

其中， γ_i 为该业务流的信干噪比； $\tau(\gamma_i)$ 为空口信道相关的时延，包括基站因调度发生的排队时延、发送时延及因重传造成的重传时延，这些因素均与信道质量相关； ϕ_i 为空口传输无关的时延，包括核心网、基站、终端处理时延和核心网传输时延，这些时延与设备软硬件结构、传输网拓扑结构、数据包大小等因素相关，而不受无线信道质量的影响。

存在最大不确定性的 $\tau(\gamma_i)$ 可进一步分解为

$$\tau(\gamma_i) = \left\lceil \frac{l_i}{R_{\text{urllc}}^i} \right\rceil d_{\text{slot}} + (K_i - 1)d_{\text{retr}} \quad (9)$$

其中， R_{urllc}^i 为业务流 f_i 的 5G 超可靠低时延通信 (uRLLC, ultra reliable low latency communication) 空口数据传输速率； d_{slot} 为 uRLLC 微时隙的时间长度； K_i 为 5G 空口最大传输次数， $K_i \geq 1$ ，若 $K_i > 1$ ，则表示数据包在 5G 系统进行了重传。

5G uRLLC 的空口速率 R_{urllc}^i 与无线信道质量相

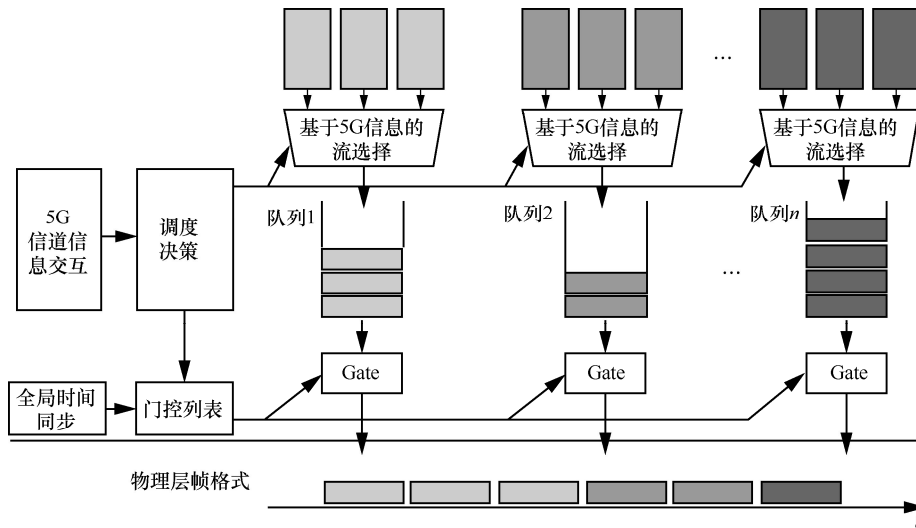


图 8 基于 5G 信道信息的 TSN 队列管控架构

关。不失一般性，本文考虑的路径损耗 g （单位为 dB）可以表示为

$$g = -128.1 - 37.6 \lg(d), d \geq \delta \quad (10)$$

其中， d 表示终端设备与 5G 基站之间的距离，且 $\delta=35$ m 是最小距离约束。小尺度衰落 h_f 服从均值为 0、方差为 $\sigma_h^2=1$ 的瑞利分布。在 uRLLC 中，小尺度衰落的相关时间大于上行链路的帧周期，所以本文需考虑快衰落对信道造成的影响。uRLLC 中链路的容量可以表示为

$$R_{\text{urllc}}^i = \frac{n_i B_{\text{RB}}}{\ln 2} \left[\ln \left(1 + P_{\text{tx}} \frac{|h_f|^2 g}{N_0 n_i B_{\text{RB}}} \right) \right] \quad (11)$$

其中， $n_i (n_i \leq N_{\text{max}})$ 为分配给业务流 f_i 的资源块 (RB, resource block) 数目， N_{max} 为系统最大 RB 数目， B_{RB} 为资源块频带宽度， P_{tx} 为发射功率， N_0 为单边噪声谱密度。 n_i 的取值由业务流 f_i 的数据包大小 l_i 及传输块 (TBS, transfer block size) 决定，即 $n_i = l_i / \text{TBS}_i$ 。

TBS 与调制编码方式 (MCS, modulation and coding scheme) 等级有关，而 MCS 等级又进一步由业务流信道质量决定。具体而言，首先，将承载业务流 f_i 的无线资源的信道状况 γ_i 采用非线性映射 $\text{CQI}_i = f(\gamma_i)$ ；然后，查询 MCS 和 CQI 的映射表，得到业务流 f_i 数据包所采用的调制编码等级 MCS_i ；最后，根据 TBS 与 MCS 的映射表，得到当前 MCS 等级下单位资源块能够传输的数据量 TBS_i 。

为了保证数据传输的可靠性，5G 系统采用了混合自动重传请求 (HARQ, hybrid automatic repeat request)。然而，重传需等待通信对端的 ACK/NACK 消息，并遵循 5G HARQ 的调度时序，因此，在式(9)中，将数据包每一次重传时延定义为 d_{retr} 。考虑到在 5G uRLLC 空口采用半持续调度 (SPS, semi-persistent schedule) 方式承载业务流 f_i ，业务流 f_i 的重传将和初次传输使用相同的资源及 MCS 等级。

K_i 定义业务流 f_i 在 5G 系统中的最大传输次数。按照 3GPP 协议要求，通常是采用半静态预设，若超出最大传输次数门限仍不能实现数据的正确接收，则该数据包被丢弃。本文对最大传输次数的取值采用阶梯函数，其定义如式(12)所示。

$$K_i = \begin{cases} \alpha_0, & f(\gamma_i) \geq \Delta_{\text{up}} \\ \alpha_1, & \Delta_{\text{low}} \leq f(\gamma_i) \leq \Delta_{\text{up}} \\ \alpha_2, & f(\gamma_i) \leq \Delta_{\text{low}} \end{cases} \quad (12)$$

其中， $\alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_2$ 。根据承载业务流的无线资源信道质量信息来确定最大重传的次数，具体如下。当 $f(\gamma_i)$ 低于最小阈值时，预判该信道状况较差，因此，增大 K_i ，增加 5G 系统传输时延预算，避免因重传而导致的 DS-TT 门控列表状态的变化；当预判信道质量较好时，发生重传的概率较低，则降低 K_i 取值；当预判信道质量极好时，进一步降低 K_i 值。

本文假设 5G 采用增量冗余 HARQ，发送端每次发送完整数据包，接收端合并多次接收的数据，实现冗余增益的目的。业务流 f_i 数据包在 5G 中成功概率为

$$P_{\text{suc}} = 1 - \prod_{k=1}^{K_i} P \left(\sum_{j=1}^k \gamma_i^{(j)} < \gamma_{\text{th}} \right) = 1 - \prod_{k=1}^{K_i} P \left(\sum_{j=1}^k |h_f^{(j)}|^2 \leq \frac{N_0 n_i B_{\text{RB}}}{g P_{\text{tx}}} \gamma_{\text{th}} \right) \quad (13)$$

其中，业务流 f_i 数据包在 5G 系统中第 k 次传输时的小尺度衰落为 $h_f^{(k)}$ ，令 $z_k = \sum_{j=1}^k |h_f^{(j)}|^2$ ，有

$$f(z_k) = \begin{cases} \frac{(z_k)^{k-1} e^{-g z_k}}{(k-1)!}, & z_k \geq 0 \\ 0, & z_k < 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中， $g = \frac{1}{2\sigma_h^2}$ 。根据式(13)可得

$$P_{\text{suc}} = 1 - \prod_{k=1}^{K_i} \frac{g^k}{(k-1)!} \int_0^{\frac{N_0 n_i B_{\text{RB}}}{g P_{\text{tx}}} \gamma_{\text{th}}} (z_k)^{k-1} e^{-g z_k} dz_k \quad (15)$$

假设业务流 f_i 的丢包率最低要求为 θ ，当 $P_{\text{suc}} \geq \theta$ 时才能满足业务流 f_i 的 QoS 需求。

结合 TSN 域和 5G 域的传输时延分析可得

$$D_{\text{TSN}}^i + D_{\text{5Gs}}^i = \sum_{j=1}^{N_m} \frac{l_j}{R_{\text{TSN}}} + \sum_{o=1}^{N_s} \frac{l_o}{R_{\text{TSN}}} + \left[\frac{l_i}{R_{\text{urllc}}^i} \right] d_{\text{slot}} + (K_i - 1) d_{\text{retr}} + \phi_i \quad (16)$$

为了保证端到端数据传输 QoS 要求，式(11)中各变量的取值规划需满足式(7)的要求，即 $D_{\text{TSN}}^i + D_{\text{5Gs}}^i < D_i'$ ；若当前因重传次数导致 5G 系统传输时延预算超过了式(7)的要求，则将 5G 系统传输时延修改为

$$D_{\text{5Gs}}^i = D_i' - D_{\text{TSN}}^i - \phi_i \quad (17)$$

其中, α_i 为一个微小的时间偏移量, 确保满足式(7)的端到端时延约束条件。根据式(17)与式(8), 可以得到当前 5G 系统传输时延规划下空口的传输时延约束, 并根据式(9)可以得到允许的最大重传次数。结合业务所需要的丢包率指标, 将上述已知最大重传次数和成功概率值代入式(15), 可得到所需的时频传输资源数量, 从而通过降低 MCS 等级, 以资源有效性换取时间约束条件下的传输可靠性。

统筹考虑业务流端到端时延, 为保证在 DS-TT 到 ES3 的链路上不发生“碰撞”, 还需对相邻业务流数据包间的发送间隔做出要求。假设 f_i 和 f_{i+1} 分别表示当前发送的流和下一帧发送的流, 则 2 个流数据包间的间隔应满足

$$A = \max \left\{ \frac{l_i}{R_{\text{TSN}}}, [(D_{\text{TSN}}^{i+1} + D_{5\text{Gs}}^{i+1}) - (D_{\text{TSN}}^i + D_{5\text{Gs}}^i)] \right\} \quad (18)$$

当 $A = l_i/R_{\text{TSN}}$ 时, 则流 f_{i+1} 的 5G 系统传输时延预算将修正为

$$D_{5\text{Gs}}^{i+1} = (D_{\text{TSN}}^i - D_{\text{TSN}}^{i+1}) + D_{5\text{Gs}}^i + A \quad (19)$$

4 仿真分析

4.1 仿真参数设置

根据 3GPP TS38.214 的定义, 针对 uRLLC 的 CQI 采用 4 bit 定义, 编号为 0~15, 只采用 QPSK, 16QAM 和 64QAM 的调制方式。5G 与 TSN 系统仿真参数如表 1 所示; 在业务参数设置方面, 本文仅考虑具有周期性及时间触发特性的工业业务流, 相关业务参数如表 2 所示。

表 1 5G 与 TSN 系统仿真参数

参数名称	参数取值
子载波间隔/kHz	30
系统带宽/MHz	100
传输时延间隔 TTI/ms	0.25
重传时延/ms	1
5G 调度方式	半静态调度
TSN 传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	1 000
TSN 调度器	TAS

表 2 时间触发业务流参数

参数名称	参数取值
ES ₁ 业务流周期/ms	5
ES ₁ 业务流包长度/B	1 000
ES ₂ 业务流周期/ms	10
ES ₂ 业务流包长度/B	1 200

4.2 仿真结果及分析

空口最大的不确定性来源于信道变化带来的数据包传输成功率的不确定性。图 9 展示了不同信号解调门限 ξ_{th} 、不同最大传输次数 K_i 设置场景下, 终端与基站距离 d 和数据包正确接收概率的关系。从图 9 中可以看到, 随着重传次数增加, 数据包传输成功率提高, 当最大传输次数较小时, 随着距离增加, 信号衰减增大, 信道越不稳定, 数据包成功传输概率与终端基站间距离成反比。当最大传输次数较大时, 信道变化对数据成功传输概率影响不大, 由于多次信号合并增益, 数据成功接收概率与数据包传输次数成正比。因此, 5G 系统传输时延预算中考虑数据传输次数的设置, 有助于消除信道带来的不确定性。

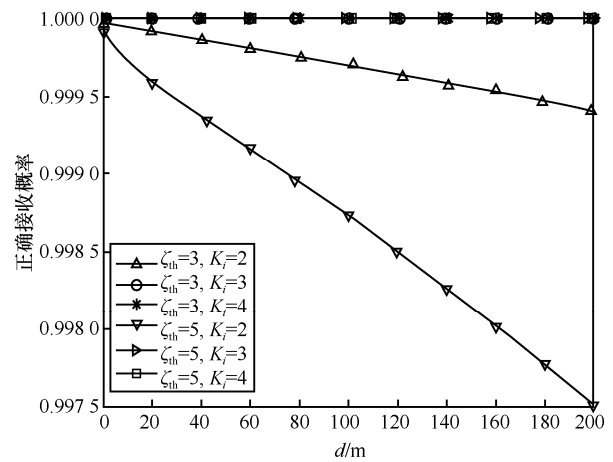


图 9 终端与基站距离和数据包正确接收概率的关系

图 10 展示了 5G 空口资源分配与数据包正确接收概率之间的关系。当 $K_i=2$ 时, 随着空口传输资源的增加, 数据包正确接收概率也会随之增加, 用效率低但可靠度高的低等级 MCS 方式, 保证数据传输的可靠性; 当资源数目增长到一定阶段时, 已经无法通过降低 MCS 获得数据传输成功率增益。随着最大传输次数门限的不断提升, 可以看到增加资源数目的效果已经不明显, 此时重传带来的多次信号合并增益提升了数据包传输正确概率, 已不需要通过牺牲资源的有效性换取数据包传输可靠性。此外, 在满足业务流丢包率指标情况下, 如满足 99.9% 数据传输成功概率, 可通过降低重传次数、降低 MCS 等级但增加空口资源数量的方式降低空口传输时延, 满足式(17)所提场景。

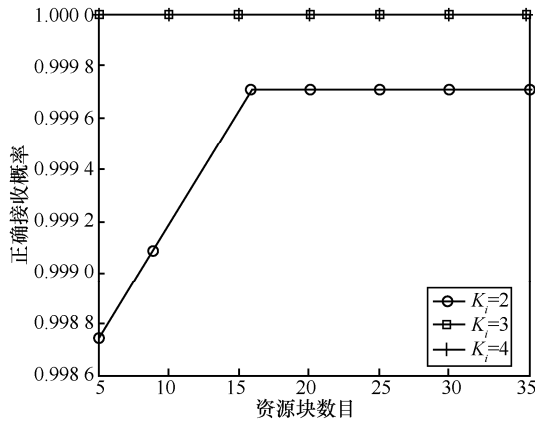


图 10 5G 空口资源分配与数据包正确接收概率关系

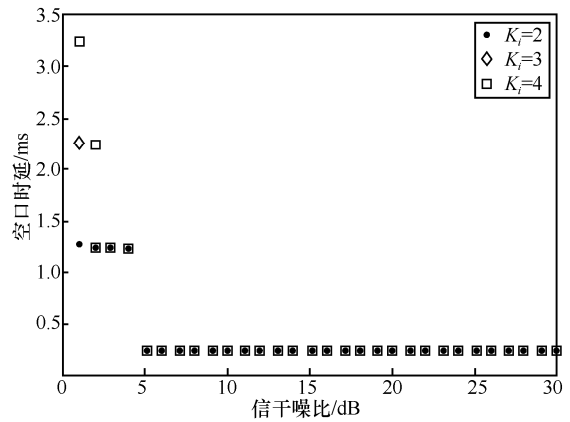


图 11 信道质量与重传时延关系

信道质量与重传时延关系如图 11 所示，其中，数据包成功解调的信噪比阈值为 5 dB。随着信道质量变好，不同最大传输次数对应的空口时延均呈现阶梯下降的情况。当信道质量较差（信噪比低于 2 dB）时，需多次重传才能满足信号合并增益达到解调门限。当信道质量较好时，由于数据包均能实现成功解调，发生数据包重传概率极低。因此，对于承载于不同信道质量空口资源上的数据包，应给予不同的最大传输次数设置。

结合上述针对 5G 系统的仿真结果可以看出，最大传输次数的设置对数据包成功接受率影响最大，因此基于 CQI 信息的 K_i 值设置为

$$K_i = \begin{cases} 2, & CQI \geq 14 \\ 3, & 3 \leq CQI < 14 \\ 4, & CQI < 3 \end{cases} \quad (20)$$

基于上述 5G 系统最大传输次数门限的设置规则，图 12 展示了 ES₁ 业务流在不同信道质量下 5G 系统传输时延预算与 5G 系统实际传输时延的关系。

由图 12 中可以看到，在一般信道质量 ($3 \leq CQI < 14$) 和较差信道质量 $CQI < 3$ 的情况下，随着信道质量变差，重传发生的概率也会逐步增加，从而造成数据包 5G 系统真实传输时延发生“突变”，但由于 5G 系统采用了 uRLLC 功能，避免了数据多次重传的出现。此外，由于已根据信道质量进行数据包最大传输次数的预设，因此，业务流真实传输时延并未超过 5G 系统传输时延预算，通过 DS-TT 出口处门控列表机制的控制，消除了 5G 无线信道变化导致的传输时延抖动，实现了跨网数据传输时延的确定性。

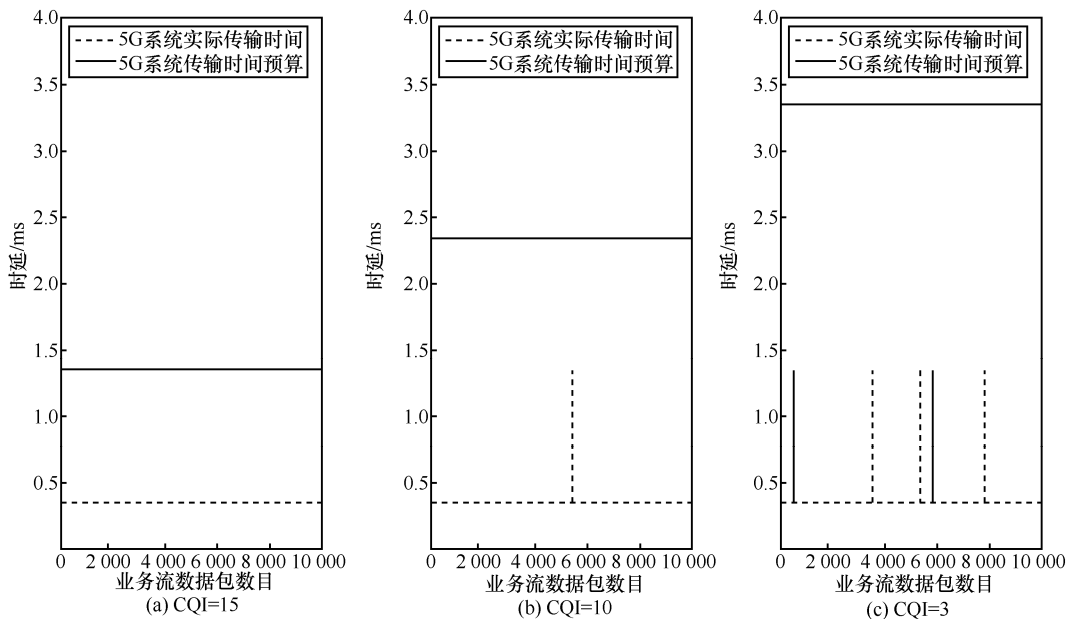


图 12 不同信道质量下的 5G 系统传输时延预算与实际传输时延的关系

本文所提 5G 与 TSN 联合时间调度机制对 TSN 域中的队列管理进行了改进，根据分配给业务流的 5G 空口资源信道状况优劣对其排队优先级进行定义。图 13 给出了具有相同业务优先级（即业务周期相同）的 3 个业务流在 TSN 域传输时延，可以看出，由于 5G 空口资源信道状况差的业务流在 TSN 域会被优先处理，因此其 TSN 域的时延会相对较低。

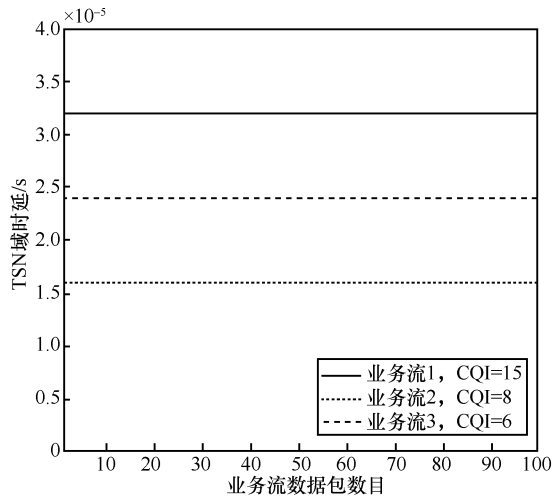


图 13 不同信道质量情况下 TSN 域时延分析

下面对比本文所提机制的端到端时延性能，对比机制在 TSN 域不考虑业务流在 5G 承载无线资源的信道质量。如图 14 所示，对于未考虑 5G 信道质量的机制，数据包在 TSN 域根据 FIFO 的原则进行排队，由于不同业务流数据包到达具有一定随机性，因此承载于最差信道质量的业务流在 TSN 域的处理顺序具有一定不确定性。随着同一优先级业务流数目的增加，本文所提机制考虑了 5G 信道质量影响，其端到端时延性能优于未考虑 5G 信道质量信息的对比机制。

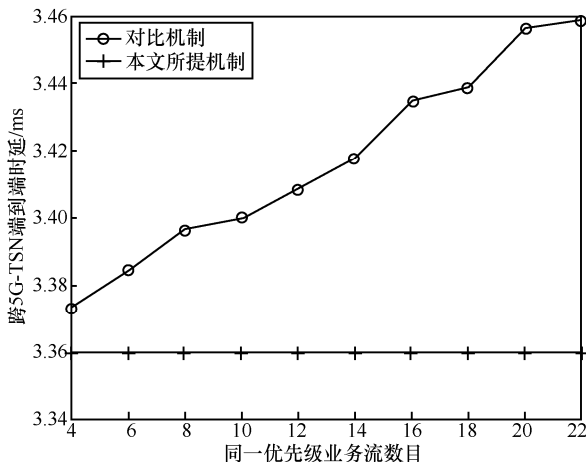


图 14 不同机制端到端时延性能对比

5 结束语

针对 5G 赋能工业垂直领域需求，本文首先对 5G 与 TSN 协同传输的必要性和迫切性进行了分析；然后对 3GPP R16 中提出的 5G TSN 桥接网络架构、跨域数据传输流程及 5G 空口对确定性传输机制的影响进行了阐述，分析了 5G 系统传输时延预算在跨域确定性数据传输中的重要性，并提出了一种基于无线信道信息的 5G 与 TSN 联合调度机制，重点对 TSN 域时延和 5G 系统时间预算规划机制进行了阐述。仿真结果表明，本文所提联合时间调度机制通过 5G 信道质量信息向 TSN 域的共享，使承载于信道质量较差无线资源上的业务流能够获得更低的 TSN 域时延；并能够通过合理设置 5G 系统传输时延预算，有效消除空口变化对确定性传输机制的影响，为时间触发业务流提供端到端确定性时延传输保障。

本文重点在于探讨无线信道变化对于 5G 系统整体传输时延的影响，并未深入探讨针对多时间敏感业务流并发条件下无线资源分配和差异化 QoS 保障策略。因为未来智能工厂中不仅存在时间敏感类业务、还存在视频、传感器数据采集等多种类型业务，如何在无线资源受限条件下构建满足时间敏感业务流确定性传输需求、并同时支持其他 5G 业务传输的资源分配与协同管理机制，将是 5G 与 TSN 联合实时调度需要进一步考虑的研究问题。

参考文献:

- [1] WOLLSCHLAEGER M, SAUTER T, JASPERNEITE J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of Things and industry 4.0[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 17-27.
- [2] VITTURI S, ZUNINO C, SAUTER T. Industrial communication systems and their future challenges: next-generation Ethernet, IIoT, and 5G[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 944-961.
- [3] SPINELLI F, MANCUSO V. Toward enabled industrial verticals in 5G: a survey on MEC-based approaches to provisioning and flexibility[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 596-630.
- [4] 丛培壮, 田野, 龚向阳, 等. 时间敏感网络的关键协议及应用场景综述[J]. 电信科学, 2019, 35(10): 31-42.
- [5] CONG P Z, TIAN Y, GONG X Y, et al. A survey of key protocol and application scenario of time-sensitive network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(10): 31-42.
- [6] 5G ACIA White Paper. Integration of 5G with time-sensitive networking for industrial communications[R]. 2020.
- [7] STRIFFLER T, MICHAJLOW N, BAHR M. Time-sensitive networking in 5th generation cellular networks - current state and open top-

- ics[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 547-552.
- [7] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [8] WG802.1. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks: IEEE Std 802.1Q-2018[S]. IEEE, 2018.
- [9] FINN N. Introduction to time-sensitive networking[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 22-28.
- [10] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [11] GODOR I, LUVISOTTO M, RUFFINI S, et al. A look inside 5G standards to support time synchronization for smart manufacturing[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2020, 4(3): 14-21.
- [12] 3GPP. System Architecture for the 5G System: 3GPP TS 23.501[S]. 2020
- [13] 张强, 王卫斌, 陆光辉. 工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6): 21-26.
ZHANG Q, WANG W B, LU G H. 5G TSN key technologies in industrial Internet scenario[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(6): 21-26.
- [14] MANNWEILER C, GAJIC B, ROST P, et al. Reliable and deterministic mobile communications for industry 4.0: key challenges and solutions for the integration of the 3GPP 5G system with IEEE[C]//Proceedings of Mobile Communication - Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [15] LARRAÑAGA A, LUCAS-ESTAÑ M C, MARTINEZ I, et al. Analysis of 5G-TSN integration to support industry 4.0[C]//Proceedings of 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1111-1114.
- [16] 3GPP. Procedures for the 5G System(5GS); stage 2:3GPP TS 23.502[S]. 2020.
- [17] BASUMATARY C, SATHEESH H S. Queuing policies for enhanced latency in time sensitive networking[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [18] ZHOU Z F, LEE J, BERGER M S, et al. Simulating TSN traffic scheduling and shaping for future automotive Ethernet[J]. Journal of Communications and Networks, 2021, 23(1): 53-62.
- [19] RAY J K, BISWAS P, BERA R, et al. TSN enabled 5G non public network for smart systems[C]//Proceedings of 2020 5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

[作者简介]



孙雷 (1984-), 男, 贵州安顺人, 博士, 北京科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为移动通信技术、时间敏感网络、工业确定性网络、5G 与时间敏感网络协同传输技术、异构网络联合资源管理机制等。



王健全 (1974-), 男, 山西平遥人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为工业泛在网络、工业互联网、工业互联网安全、网络协同与智能制造等。



林尚静 (1986-), 女, 湖北武汉人, 博士, 北京邮电大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为用户中心无定形网络、无线资源管理、数据驱动的 5G 网络优化等。

马彰超 (1984-), 男, 山西晋城人, 博士, 北京科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为工业互联网安全、5G 与工业网络协同、工业互联网、量子保密通信等。

李卫 (1966-), 女, 重庆人, 北京科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为工业互联网、移动通信系统与关键技术等。

Qilian Liang (1972-), 男, 博士, 美国得克萨斯大学阿灵顿分校教授, 主要研究方向为无线通信、无线传感网络、信号处理等。

黄蓉 (1986-), 女, 四川资阳人, 博士, 中国联通研究院高级工程师, 主要研究方向为 5G/6G 网络架构及关键技术、确定性网络和工业互联网。